

Si{111} 晶面粒子堵塞坑的新现象

魏成连 董玉兰 高之纬

(中国科学院高能物理研究所)

1980 年 1 月 19 日收到

提 要

本文报道了从粒子背散射堵塞效应的实验中所发现的单晶 Si 的 {111} 晶面粒子堵塞坑的新现象。单晶 Si 的 {111} 晶面有两个面间距 $d_{\{111\}}^{(a)}$ 和 $d_{\{111\}}^{(b)}$ ，而 {110} 晶面只有一个面间距 $d_{\{110\}}$ 。由此导致两者的堵塞坑是不同的，我们已从 α 粒子和质子的 Si 单晶堵塞效应的实验得到了证实，并由此估计了 $d_{\{111\}}^{(a)}$ 和 $d_{\{111\}}^{(b)}$ 以及 $d_{\{110\}}$ 的 $2\phi_{1/2}$ 角。据作者了解，到目前为止，国内外还没有人发现此现象。此现象的发现对复杂晶体的堵塞和沟道效应的研究开阔了前景。

引 言

单晶 Si 的 {111} 晶面属于不等面间距的晶面 (图 1)，它有两个面间距 $d_{\{111\}}^{(a)}$ 和 $d_{\{111\}}^{(b)}$ ，彼此关系为 $d_{\{111\}}^{(a)} = 3d_{\{111\}}^{(b)}$ 。对于不等面间距的晶面其堵塞效应跟相等面间距的堵塞效应

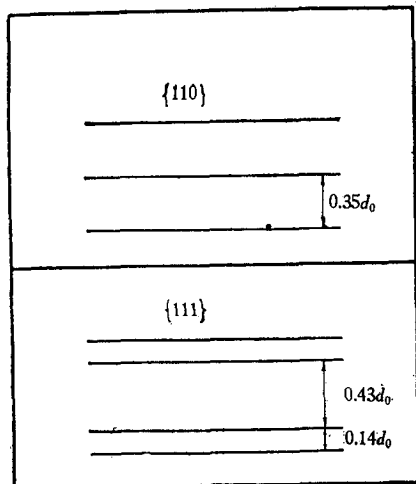


图 1 单晶 Si 的 {110} 晶面和 {111} 晶面的结构 晶格常数 $d_0 = 5.431 \text{ \AA}$

应该有所不同。因为 Si 的 {110} 晶面对粒子堵塞坑的贡献是 $d_{\{110\}}$ ；而 {111} 晶面对粒子堵塞坑的贡献是 $d_{\{111\}}^{(a)}$ 和 $d_{\{111\}}^{(b)}$ 。因此根据文献 [1, 2] 的 $\phi_{1/2}$ 和 ϕ_a 的表达式，对 Si 的 {111} 晶面的 $\phi_{1/2}$ 和 ϕ_a 应该考虑 d_p 不同这一因素。

$$\phi_{1/2} = KF_{ps}[mu_1/a, (d_p^{(a)} \text{ 或 } d_p^{(b)})/a]\phi_a,$$

$$\phi_a = [2Z_1Z_2N(d_p^{(a)} \text{ 或 } d_p^{(b)})e^2a/E]^{1/2},$$

其中 $\phi_{1/2}$ 为晶面堵塞半角， K ， m 为参数， u_1 为热振幅， a 为托马斯-费密屏蔽半径， $d_p^{(a)}$ ， $d_p^{(b)}$ 分别为 Si 的 {111} 晶面的两个面间距， ϕ_a 为晶面的特征角， Z_1 ， Z_2 分别为入射粒子和靶原子的原子序数， N 为靶原子的体密度， E 为入射粒子的能量， e 为电子的电荷， F_{ps} 为函数。

我们用静电加速器产生的 α 粒子和质子对单晶的 Si<111> 定向做了背散射堵塞效应的实验，利用显微密度计 (德国进口 GIII 型) 多次仔细地测量了堵塞图形上的 {111} 和 {110} 晶面堵塞线的粒子散射产额的角分布，结果在 {111} 晶面上总存在这种新现象。实验结果跟预料到的结果相符。

实验和结果

实验安排见图 2, 束流由本所 2.5 MeV 静电加速器提供. 束流从磁分析器出来经过两次准直最后穿过孔径为 $\phi = 0.5\text{mm}$ 的钽片(厚 0.1mm)打在单晶 Si 上, Si 的 $\langle 111 \rangle$ 晶轴偏离束流方向为 5° 左右. 径迹探测器紧贴紫铜片, 中央有一小孔让束流穿过, 紫铜片上加有负偏压 200 V, 以防止二次电子发射.

图 2 所示整个装置是放在靶室真空中的, 真空度大约 10^{-5} — 10^{-6} 托, 靶室直径为 250mm, 靶晶体放在靶室中央的靶杆上, 靶流用积分器测量. 束流能量为几百 keV, 流强为几至十几 nA.

径迹探测器距离晶体表面为 30mm 左右, 晶体表面用金刚砂由粗到细研磨后, 用化学

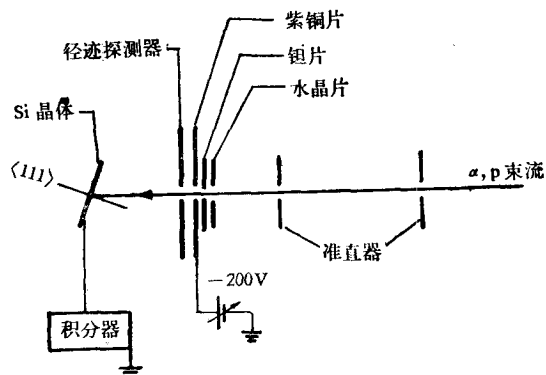


图 2 实验安排

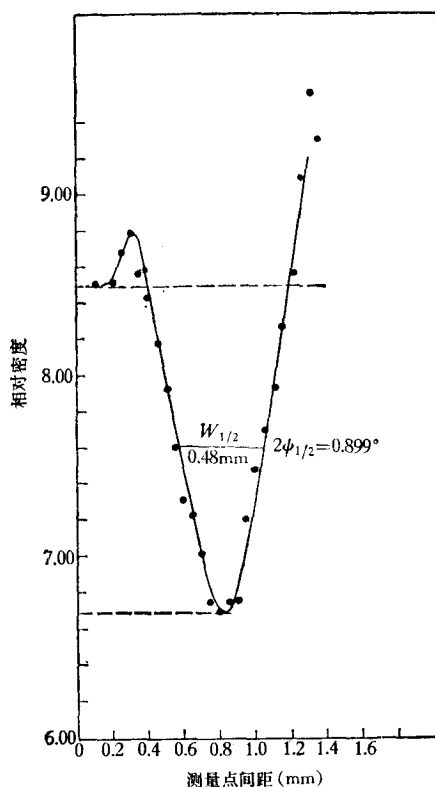


图 3 Si 单晶 $\langle 111 \rangle$ 定向 α 粒子堵塞图形上 (110) 晶面堵塞坑曲线 $E_\alpha = 475\text{keV}$, $L = 30\text{mm}$, 室温, kNo.12

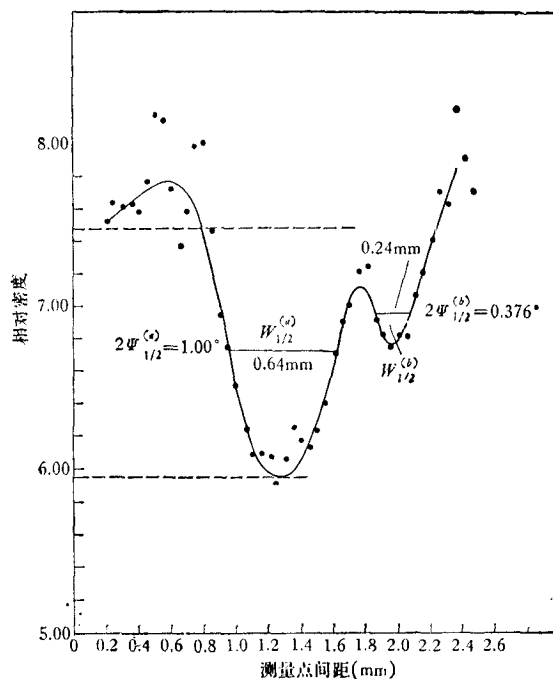


图 4 Si 单晶 $\langle 111 \rangle$ 定向 α 粒子堵塞图形上 (111) 晶面堵塞坑曲线 $E_\alpha = 475\text{keV}$, $L = 30\text{mm}$, 室温, kNo.12

液(十份硝酸加一、二份氢氟酸)腐蚀处理。径迹探测器主要成分是硝酸纤维,径迹探测器用来记录背散射回来的 α 粒子或质子,记录有 α 粒子或质子的径迹探测器放在6N的NaOH腐蚀液中蚀刻,恒温40℃左右。蚀刻一定的时间后,便显出由斑点和线条组成的堵塞图形。

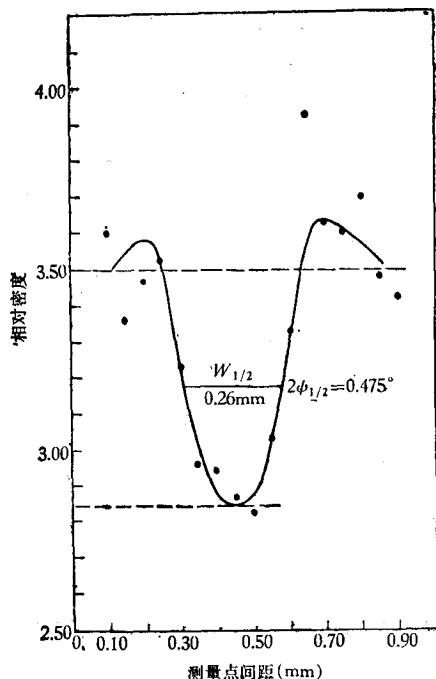


图5 Si单晶<111>定向质子堵塞图形上(011)晶面堵塞坑曲线 $E_p = 600\text{keV}$, $L = 29\text{mm}$, 室温, kNo.19

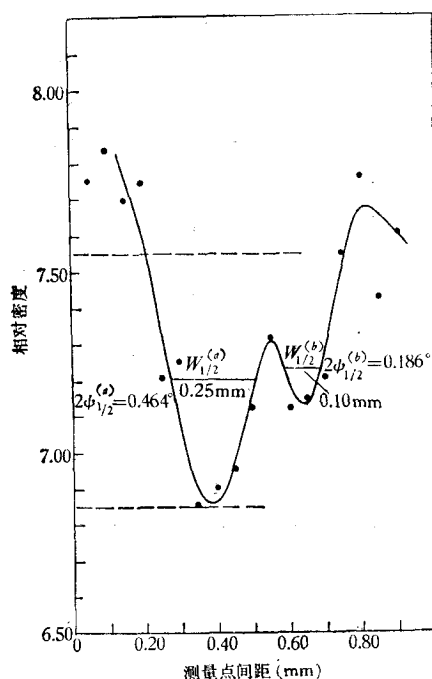


图6 Si单晶<111>定向质子堵塞图形上(111)晶面堵塞坑曲线 $E_p = 600\text{keV}$, $L = 29\text{mm}$, 室温, kNo.19

堵塞图形上的线的密度变化曲线用显微密度计测量,我们测量了{110}晶面的 α 粒子堵塞坑(图3),由此得到 $2\phi_{1/2}$ 的角,跟计算预料到的相符;但我们测量{111}晶面的 α 粒子堵塞坑时其形状却跟{110}晶面的很不相同,{111}晶面的堵塞坑上分出另一个较小的堵塞坑(图4)。我们也做了质子的Si单晶<111>定向的质子堵塞图,同样用显微密度计测量了{110}和{111}晶面堵塞线的堵塞坑,测量的结果跟 α 粒子的相同(图5和图6)。由上面的堵塞坑分别得到 $2\phi_{1/2}^{(a)}$ 和 $2\phi_{1/2}^{(b)}$ 的角,也跟计算预料到的相符。为了比较也测量了{110}晶面堵塞坑的 $2\phi_{1/2}$ 。测量的结果见下表1。

表1 单晶 Si<111> 定向的 α 粒子和质子的堵塞图形上的{110}和{111}晶面的 $2\phi_{1/2}$ 实验和计算值

入射粒子	能量 (MeV)	靶晶体	晶 面	面间距 $d(\text{\AA})$	实验 $2\phi_{1/2}(^\circ)$	计算 $2\phi_{1/2}(^\circ)$
α	0.475	Si	{110}	1.920	0.899 ± 0.014	0.732 ± 0.007
α	0.475	Si	{111}	$2.352(d^{(a)})$	1.001 ± 0.022	0.859 ± 0.009
α	0.475	Si	{111}	$0.784(d^{(b)})$	0.376 ± 0.001	0.283 ± 0.003
p	0.600	Si	{110}	1.920	0.475 ± 0.002	0.461 ± 0.005
p	0.600	Si	{111}	$2.352(d^{(a)})$	0.464 ± 0.007	0.442 ± 0.004
p	0.600	Si	{111}	$0.784(d^{(b)})$	0.186 ± 0.011	0.178 ± 0.002

讨 论

单晶 Si 的 {110} 和 {111} 晶面的堵塞坑是在同一张径迹片上用显微密度计测量的, 毫无疑问其它一切条件都是相同的. {110} 晶面的堵塞坑上从未见有小坑, 而 {111} 晶面则分出一个坑, 这坑的出现归因于 {111} 晶面结构不同于 {110} 晶面结构. 我们认为这坑是由于 {111} 晶面有两个不等面间距的较小的一个 $d_{(111)}^{(b)}$ 引起的, 而测量的 $2\psi_{1/2}$ 跟计算预料到的相符 (见表), 实验是重复的. 1970 年前后曾有人^[3,4]从偏沟道 (dechanneling) 实验上试图观察这种现象的差别, 但未成功. 我们观察到的这种新现象将为利用堵塞和沟道效应研究复杂的晶体提供了理论上和应用上的意义.

本组加速器运转的同志范景云、王启良、范志芳、霍忠义、李五桂、刘振铎、孙树荣以及戴依明提供了束流的工作.

最后感谢叶铭汉先生对本文的审阅和对本工作的关心. 同时也感谢本所固体径迹探测器研究小组提供固体径迹探测器.

参 考 文 献

- [1] D. S. Gemmell, *Rev. Mod. Phys.*, **46** (1974), 129.
- [2] J. W. Mayer *et al.*, "Ion Beam Handbook for Material Analysis", (1977), 67.
- [3] R. R. Appleton *et al.*, Brookhaven National Laboratory Report No. BNL-50083, 45 (1968).
- [4] W. White *et al.*, *Phys. Lett.*, **A28** (1969), 651.

A NEW PHENOMENON ABOUT THE {111} PLANAR PARTICLES BLOCKING DIP IN SINGLE CRYSTAL Si

WEI CHENG-LIAN DONG YU-LAN GAO ZHI-WEI
(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A new phenomenon about {111} planar particles blocking dip in Si has been found. Between the {111} planes in single crystal Si there are two interplanar spacings, $d_{(111)}^{(a)}$ and $d_{(111)}^{(b)}$, but there is only one interplanar spacing $d_{(110)}$ between Si {110} planes, so that their blocking dips would be different. We have observed this difference from the experiments of α particle and proton blocking effect in single crystal Si. We have also estimated the $2\psi_{1/2}$ angles from planar particles blocking dips with $d_{(111)}^{(a)}$, $d_{(111)}^{(b)}$ and $d_{(110)}$ in Si respectively. According to the author's knowledge, up to the present, this phenomenon has not yet been discovered at home and abroad. This new phenomenon will promote the study of complex crystals using the blocking and channeling effects.